

АНАЛІТИЧНА ХІМІЯ. ФІЗИЧНА ТА КОЛОЇДНА ХІМІЯ. НЕОРГАНІЧНА ХІМІЯ. ОРГАНІЧНА ХІМІЯ

Ю. В. Сухачький, М. В. Шепіда, К. М. Сірик
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімії і технології неорганічних речовин
yurii.v.sukhatskyi@lpnu.ua

ПЕРЕДОВІ ПРОЦЕСИ ОКИСНЕННЯ НА ОСНОВІ НАТРІЮ ПЕРКАРБОНАТУ. ОГЛЯД

<https://doi.org/10.23939/ctas2022.01.001>

Розглянуто переваги натрію перкарбонату як носія “твердого гідрогену пероксиду”, порівняно з гідрогену пероксидом у рідкій фазі. Наведено методи гомогенної (активація ультрафіолетовим випромінюванням, електророзрядною плазмою, в ультразвуковому полі, йонами металів) та гетерогенної (природними та штучно синтезованими мінералами, наночастинками заліза, іммобілізованими на допоміжні матеріали, наночастинками сполук заліза, біметалевими наноконкомпозитами, фероценом) активації натрію перкарбонату та їх застосування у передових процесах окиснення органічних сполук на його основі. Встановлено, що кисле середовище ефективніше для гомогенної активації натрію перкарбонату йонами металів (зокрема, Fe^{2+}), а нейтральне або лужне середовище придатніше для гетерогенної активації натрію перкарбонату.

Ключові слова: натрію перкарбонат; гідрогену пероксид; передові процеси окиснення; активація; гідроксильні радикали; органічні сполуки; наночастинки заліза.

Вступ

Натрію перкарбонат – альтернативне джерело гідрогену пероксиду. Ця тверда сполука є аддуктом натрію карбонату та гідрогену пероксиду – $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ [1]. Теоретична концентрація активного кисню у натрію перкарбонаті дорівнює 15,3 % мас. [2, 3]. За зовнішнім виглядом натрію перкарбонат – це мікрогранули, термічно стабільні за кімнатної температури. Термічний розклад натрію перкарбонату починається за температури > 373 К. Його розчинність у воді ~ 1 моль/дм³, а рН 1 % водного розчину натрію перкарбонату $\sim 10,5$ [4]. У воді натрію перкарбонат дисоціює на натрію карбонат та гідрогену пероксид [5].

Натрію перкарбонат є “зеленим” реагентом із високим окиснювальним потенціалом (1,8 В) [6]. Тому його використовують для окиснення органічних забруднювачів водних середовищ, як компонент антисептичних засобів і пральних порошків [4], для інгібування активності мікроорганізмів [7, 8], як лікувальний засіб для бороть-

би із ектопаразитарними інфекціями риб [5]. Також окиснювальну дію натрію перкарбонату застосовують для запобігання цвітінню водойм [9], зменшення обростання мембран водоростями у мембранних технологіях очищення води [10] та мутності фільтрату звалищ перед його обробленням ультрафіолетовим випромінюванням [11]. Нетрадиційним є використання натрію перкарбонату як католіту під час опріснення води [12].

Порівняно із H_2O_2 у рідкій фазі, натрію перкарбонат як носій “твердого H_2O_2 ” має низку переваг: 1) він є стабільнішим [1]; 2) витрати на його зберігання і транспортування втричі менші [13–15]; 3) ефективніший у широкому діапазоні значень рН [16, 17]. Продукти розкладу натрію перкарбонату (карбону (IV) оксид, вода і натрію карбонат) нетоксичні, і навіть більше, наявні у природних водних системах [18], тому його використання можна ефективно суміщати з біоре mediaцією [19].

Зважаючи на нетоксичність для водних екосистем, адаптованість до роботи у широкому

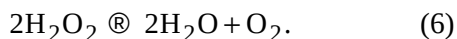
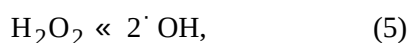
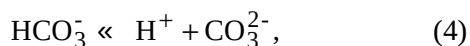
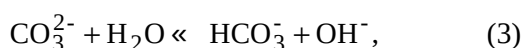
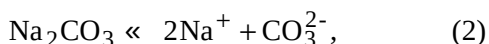
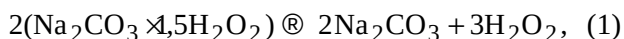
діапазоні значень рН, здатність до каталітичної активації [13], передові процеси окиснення на основі натрію перкарбонату можуть стати економічною альтернативою традиційним передовим процесам окиснення, які використовують для очищення стічних вод.

Тому метою роботи був огляд механізму процесу окиснення органічних забруднювачів водних середовищ натрію перкарбонатом, методів гомогенної та гетерогенної активації натрію перкарбонату та їх застосування у передових процесах окиснення на його основі.

1. Окиснення органічних забруднювачів водних середовищ натрію перкарбонатом

Натрію перкарбонат використовували для окиснювальної деградації S-вмісних моноазобарвників [20] і триарилметанових барвників [21, 22], хлорованих вуглеводнів [19, 23] та поліциклічних ароматичних вуглеводнів [24].

Натрію перкарбонат легко розчиняється у воді з утворенням натрію карбонату, гідрогену пероксиду та лужного середовища. Гідрогену пероксиду, своєю чергою, може окиснювати органічні забруднювачі водних середовищ внаслідок утворення гідроксильних радикалів чи інших оксигеновмісних реакційноздатних видів, а також розкладатись із утворенням води та виділенням кисню [23]:



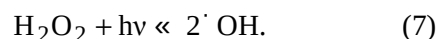
Внаслідок оброблення водного розчину трихлороетилену (у концентрації 1 ммоль/дм³) натрію перкарбонатом упродовж 3600 с досягнуто ступеня окиснювальної деградації трихлороетилену 95 % із мольним співвідношенням трихлороетилен : натрію перкарбонат = 1 : 4. Значення рН не впливало на ефективність окиснення трихлороетилену, але визначало форму і концентрацію проміжних продуктів окиснення. Ефективність мінералізації, яку оцінювали за утворенням CO₂, була на 30 % вищою у кислому середовищі [19].

Методи гомогенної активації натрію перкарбонату

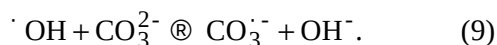
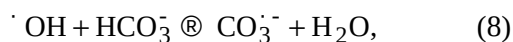
1.1. Активація у фізичних полях

1.1.1. Активація ультрафіолетовим випромінюванням

Суть дії ультрафіолетового (УФ) випромінювання на утворений внаслідок розчинення у воді натрію перкарбонату гідрогену пероксиду полягає у його розкладі з утворенням гідроксильних радикалів ($E_{\text{OH}/\text{H}_2\text{O}} = 2,32 \text{ В}$ за рН = 7) [25]



Гідроксильні радикали можуть взаємодіяти із гідрогенкарбонат-йонами та карбонат-йонами з утворенням карбонатних радикалів, які також є окисниками органічних забруднювачів ($E_{\text{CO}_3^{\cdot -}/\text{CO}_3^{2-}} = 1,78 \text{ В}$ за рН = 7) [25]:

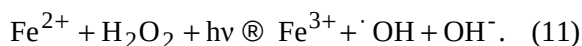


Виявлено, що використання передового процесу окиснення (УФ/Na₂CO₃·1,5H₂O₂), який ґрунтувався на активації натрію перкарбонату УФ-випромінюванням, упродовж 3600 с дало змогу досягти ступеня деградації бісфенолу А, який дорівнював 87,8 % [25]. Умови окиснювальної деградації бісфенолу А були такими: інтенсивність УФ-випромінювання – 0,1 мВт/см²; реакційний об'єм – 10 см³; рН середовища – 8,5; початкова концентрація бісфенолу А – 2 мкмоль/дм³; концентрація натрію перкарбонату – 1 ммоль/дм³. Фотоактивований натрію перкарбонат застосовували також для високоефективної деградації інших органічних сполук – нафталену [26], альбендазолу [27], аніліну [28].

Здійснюючи фотоактивацію натрію перкарбонату впродовж 3600 с вакуумним УФ-випромінюванням (передовий процес окиснення – в УФ/Na₂CO₃·1,5H₂O₂) з довжинами хвиль 185 і 254 нм, вдалось досягти ступеня деградації флюорохінолонового антибіотика ципрофлоксацину гідрохлориду 100 %. Умови процесу в УФ/Na₂CO₃·1,5H₂O₂: реакційний об'єм – 1 дм³; рН середовища – 7; початкова концентрація ципрофлоксацину гідрохлориду – 50 мг/дм³; концентрація натрію перкарбонату – 20 мг/дм³. Упро-

довж 10 хв оброблення досягнуто ступеня мінералізації 96,3 %. Mohammadi зі співробітниками [18] зазначили, що внесок радикального механізму в деградацію ципрофлоксацину гідрохлориду дорівнював 83,6 %, з них: 77,3 % – внесок гідроксильних радикалів, 6,3 % – внесок карбонатних радикалів.

Висока ефективність притаманна модифікованому процесу фото-Фентон (УФ/Fe²⁺/Na₂CO₃·1,5H₂O₂), який використовували для знебарвлення водного розчину барвника Acid Green 16 [29] й окиснювальної деградації поліциклічних ароматичних вуглеводнів [30, 31]. Генерування гідроксильних радикалів у модифікованому процесі фото-Фентон відбувається за такими реакціями [30]:

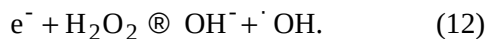


Оптимальне значення рН під час знебарвлення водного розчину барвника Acid Green 16 з використанням модифікованого процесу фото-Фентон дорівнювало 3 [29]. Результати досліджень окиснювальної деградації поліциклічних ароматичних вуглеводнів із використанням процесу УФ/Fe²⁺/Na₂CO₃·1,5H₂O₂ свідчили про його більшу ефективність під час вилучення вуглеводнів з чотирма – шістьма бензеновими кільцями, порівняно із ефективністю вилучення вуглеводнів з двома – трьома бензеновими кільцями [30, 31].

Недоліком фотоактивованих передових процесів окиснення на основі натрію перкарбонату є обмеженість їх застосування лише очищенням прозорих водних систем, що не містять завислих дисперсних частинок.

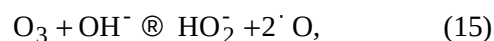
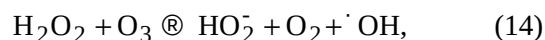
1.1.2. Активація електророзрядною плазмою

Плазма – це “суміш” електронів, йонів, вільних радикалів та нейтральних молекул [13]. В електророзрядній плазмі (ЕРП) електрони з високою енергією можуть атакувати гідрогену пероксид, джерелом якого є натрію перкарбонат, з утворенням гідроксильних радикалів

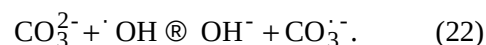
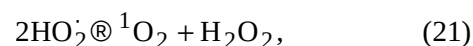
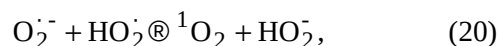
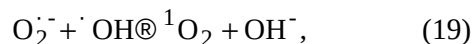
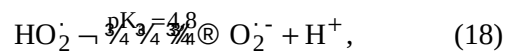
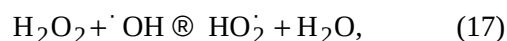


Генерування гідроксильних радикалів в ЕРП може також відбуватись внаслідок розкладу

гідрогену пероксиду під дією УФ-випромінювання, взаємодії гідрогену пероксиду з озоном та розкладу останнього в лужних умовах [32–34]:



Використання активованого ЕРП натрію перкарбонату (передовий процес окиснення – ЕРП/Na₂CO₃·1,5H₂O₂) для оброблення водного розчину диметилфталату з концентрацією 1 г/дм³ упродовж 1800 с за напруги 18 кВ дало змогу досягти ступеня деградації диметилфталату 92,1 %. Концентрація натрію перкарбонату дорівнювала 0,12 ммоль/дм³. Вирішальну роль у деградації диметилфталату відігравали гідроксильні радикали, супероксидний аніон-радикал (O₂^{·-}), синглетний кисень (¹O₂) та карбонатні радикали (CO₃^{·-}) [32], які можуть утворюватись за реакціями:



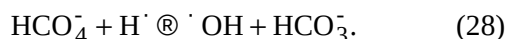
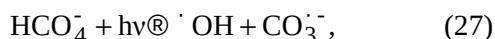
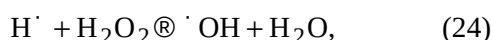
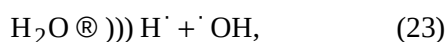
Tang зі співробітниками [33] повідомили про досягнення ступеня деградації тетрацикліну (антибіотика бактеріостатичної дії) 94,3 % упродовж 300 с оброблення імітату стічних вод за напруги 4,8 кВ активованим в ЕРП натрію перкарбонатом. Умови реалізації процесу ЕРП/Na₂CO₃·1,5H₂O₂ були такими: початкова концентрація тетрацикліну – 20 мг/дм³; концентрація натрію перкарбонату – 52 ммоль/дм³.

Основний недолік активації натрію перкарбонату ЕРП – високі енерговитрати для генерування плазмового розряду.

1.1.3. Активація натрію перкарбонату в ультразвуковому полі

Активацію натрію перкарбонату в ультразвуковому (УЗ) полі, як правило, суміщають з іншими видами активації [35, 36]. Так, деградацію антибіотика метронідазолу здійснювали

з використанням модифікованого процесу соно-Фентон ($\text{УЗ}/\text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) [35]. Сонофотоактивація натрію перкарбонату (передовий процес окиснення – $\text{УЗ}/\text{УФ-LEDs}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) дала змогу досягти синергетичного ефекту під час деградації барвника Acid Orange 7 внаслідок посиленого генерування гідроксильних радикалів. Воно зумовлене сонолізом води, взаємодією радикала Гідрогену з гідрогену пероксидом, розкладом утворених під час взаємодії гідрогенкарбонат-йонів із гідрогену пероксидом пероксомонокарбонат-йонів (HCO_4^-) в ультразвуковому полі або під дією УФ-випромінювання, або взаємодією останніх із радикалом Гідрогену [36]:



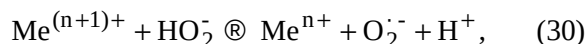
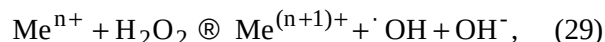
Встановлено, що ступінь деградації барвника Acid Orange 7 з використанням активованого УЗ-коливаннями та УФ-випромінюванням натрію перкарбонату становив 93,7 % [36]. Умови реалізації процесу $\text{УЗ}/\text{УФ-LEDs}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$: об'єм водного розчину барвника (реакційний об'єм) – 300 см^3 ; початкова концентрація Acid Orange 7 – 25 $\text{мг}/\text{дм}^3$; рН реакційного середовища – 6,0; концентрація натрію перкарбонату – 1,5 $\text{ммоль}/\text{дм}^3$; інтенсивність УФ-випромінювання у центрі реактора –

2,55–2,71 $\text{мВт}/\text{см}^2$; потужність генератора УЗ – 100 Вт; частота УЗ – 20 кГц; тривалість оброблення – 5400 с.

Використання кавітаційних механізмів активації натрію перкарбонату (зокрема, ультразвукової активації), які можна ефективно суміщати з іншими видами активації, доволі перспективне у технологіях очищення водних середовищ від біорезистентних N-заміщених органічних сполук (барвників і фармацевтичних препаратів).

1.2. Активація натрію перкарбонату йонами металів

Йони металів (Me^{n+}) активують гідрогену пероксид, який утворюється внаслідок розчинення у воді натрію перкарбонату, і зумовлюють його розклад [37]:



Зі збільшенням концентрації йонів металу зростає швидкість каталітичного розкладу H_2O_2 . Активація розкладу гідрогену пероксиду йонами металів – основа фентонподібних передових процесів окиснення [13]. Встановлено, що швидкість розкладу гідрогену пероксиду йонами металів зменшується у ряді [37]: $\text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Cu}^{2+}$. У табл. 1 наведено передові процеси окиснення органічних сполук, оснований на активації натрію перкарбонату йонами металів.

Таблиця 1

Передові процеси окиснення органічних сполук, оснований на активації натрію перкарбонату йонами металів

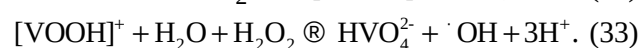
Передовий процес окиснення	Забруднювач	Концентрація забруднювача у воді	Концентрація каталізатора	Умови експериментальних досліджень	Ступінь деградації забруднювача, %	Джерело інформації
1	2	3	4	5	6	7
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}/\text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Тетрахлорометан (CCl_4)	0,125 $\text{ммоль}/\text{дм}^3$	$[\text{Fe}^{2+}]_0 = 6,25 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$	$[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 2,5 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$; $[\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}]_0 = 12,5 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$; $V = 250 \text{ см}^3$; $\text{pH}_0 = 4,92$; $T = 293 \text{ К}$; $\tau = 1800 \text{ с}$	99,1	[38]

1	2	3	4	5	6	7
$\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	4-хлорофенол ($\text{C}_6\text{H}_5\text{ClO}$)	0,778 ммоль/дм ³	$[\text{Fe}^{2+}]_0=$ =3,89 ммоль/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0=$ = $[\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}]_0=$ =3,89 ммоль/дм ³ ; $\text{pH}_0=3,0$; $T=293\text{ K}$; $\tau=300\text{ c}$	99	[39]
$\text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Імідаклоприд ($\text{C}_9\text{H}_{10}\text{ClN}_5\text{O}_2$)	1 ммоль/дм ³	$[\text{Fe}^{2+}]_0=$ =2,50 ммоль/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0=$ =60 ммоль/дм ³ ; $V=$ =500 см ³ ; $\text{pH}_0=2,0$; $T=298\text{ K}$; $\tau=7200\text{ c}$	95,4	[16]
$\text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Тетрациклін ($\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_8$)	0,2 ммоль/дм ³	$[\text{Fe}^{2+}]_0=$ =0,50 ммоль/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0=$ =0,75 ммоль/дм ³ ; $V=$ =1 дм ³ ; $\text{pH}_0=4,0$; $T=298\text{ K}$; $\tau=2700\text{ c}$	100	[1]
$\text{Fe}^{2+}/\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Трихлороетан ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3$)	0,2 ммоль/дм ³	$[\text{Fe}^{2+}]_0=$ =6,00 ммоль/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0=$ =15 ммоль/дм ³ ; $[\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}]_0=$ =1 ммоль/дм ³ ; $V=100\text{ см}^3$; $\text{pH}_0=11,0$; $T=298\text{ K}$; $\tau=10800\text{ c}$	95	[40]
$\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl} - \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 - \text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Бензен (C_6H_6)	1 ммоль/дм ³	$[\text{Fe}^{2+}]_0=$ =1,00 ммоль/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0=$ =2,0 ммоль/дм ³ ; $[\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4]_0=$ = $[\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}]_0=$ =1,0 ммоль/дм ³ ; $V=250\text{ см}^3$; $\text{pH}_0=3,0$; $T=293\text{ K}$; $\tau=600\text{ c}$	90,9	[41]
$\text{V(IV)}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Анілін ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$)	1 ммоль/дм ³	$[\text{V}^{4+}]_0=$ =1,00 ммоль/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0=$ =8,0 ммоль/дм ³ ; $V=500\text{ см}^3$; $\text{pH}_0=6,8$; $T=293\text{ K}$; $\tau=900\text{ c}$	90,05	[42]

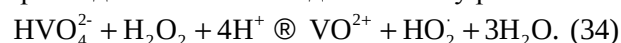
Tang зі співробітниками [38] повідомили, що додавання метанолу, ізопропанолу, етанолу чи інших органічних апротонних розчинників у водні середовища збільшує реакційну здатність супероксидного аніона-радикала ($\text{O}_2^{\cdot-}$) і, відповідно, ступінь деградації тетрахлорометану. Швидкість деградації органічних забруднювачів та ефективність передового процесу окиснення $\text{Fe}^{2+}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ підвищують, вводячи у розчин різноманітні хелатоутворювальні агенти – щавлеву або лимонну кислоти, глутамат, цистеїн [13, 40, 41]. Такі агенти стабілізують концентрацію розчиненого Fe^{2+} у реакційній системі. Хелатний комплекс “2-[біс (карбоксиметил) аміно]пропанова кислота – Cu” використали для посилення бактерицидного ефекту натрію перкарбонату щодо штамів

мікроорганізмів *Staphylococcus aureus* та *Escherichia coli* [43].

Перенесення електронів – провідний механізм активації гідрогену пероксиду йонами перехідних елементів. Li [42] розробив метод активації натрію перкарбонату з використанням йонів V(IV) (передовий процес окиснення – $\text{V(IV)}/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$). Під час активації відбувається трансфер електронів від V(IV) до гідрогену пероксиду з утворенням гідроксильних радикалів та йонів V(V):



HVO_4^{2-} – основний реакційний вид V(V) за $\text{pH}>10$. V(V) відновлюється до V(IV) гідрогену пероксидом або іншим відновником у розчині



Основні переваги активації натрію перкарбонату йонами металів – широкий діапазон робочих значень рН та велика швидкість деградації забруднювачів.

2. Методи гетерогенної активації натрію перкарбонату

У методах гетерогенної активації натрію перкарбонату як каталізатори розкладу гідрогену пероксиду використовують (табл. 2): природні (червону глину, гематит, каолінит, альбіт, кальцит, сепіоліт) [37] та штучно синтезовані мінерали (халькопірит) [44]; наночастинки (НЧ) заліза [45–47], іммобілізовані на допоміжні матеріали (цеоліт, графену оксид), або НЧ сполук заліза (наприклад, Fe_3O_4) [48]; біметалеві нанокompозити [49–52]; фероцен [53–54].

Застосування як активатора натрію перкарбонату синтезованого халькопіриту (передовий процес окиснення – $\text{CuFeS}_2/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) дало змогу здійснювати ефективну деградацію сульфаметазину навіть у нейтральному реакційному середовищі [44]. Методом спінових пасток у реакційному середовищі ідентифіковано активні форми кисню – гідроксильні, карбонатні радикали, супероксидний аніон-радикал та синглетний кисень, які брали участь в окиснювальній деградації сульфаметазину.

Завдяки великій площі поверхні та високій реакційній здатності НЧ заліза використовують як стабільне джерело Fe(II) у модифікованих системах Фентона. НЧ заліза можуть регенерувати Fe(III) до Fe(II) [4]



НЧ заліза здатні до агрегації, що зумовлено виникненням магнітних сил та великою поверхневою енергією НЧ. Для зменшення агрегації НЧ заліза їх іммобілізують на допоміжні матеріали – цеоліт [45, 46] або відновлений графену оксид (вГО) [47].

Біметалеві нанокompозити (цеоліт- Fe(НЧ) - Cu(НЧ)) [49], цеоліт- Fe(НЧ) - Ni(НЧ) [50], Fe(НЧ) - Cu(НЧ) -вГО [51], $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{НЧ})$ - CuO(НЧ) [52]) є стабільнішими й ефективнішими каталізаторами у гетерогенних фентонподібних процесах окиснення, порівняно із НЧ заліза [13].

Фероцен ($\text{Fe(C}_5\text{H}_5)_2$) – високостабільна у водних середовищах і нетоксична металоорганічна сполука, яка є джерелом йонів Fe^{2+} [53, 54]. Її зі співробітниками [54] використали фероцен для активації натрію перкарбонату у фентонподібному процесі окиснювальної деградації токсичного азобарвника – амаранту.

Таблиця 2

Передові процеси окиснення органічних сполук, основані на гетерогенній активації натрію перкарбонату

Передовий процес окиснення	Забруднювач	Концентрація забруднювача у воді	Концентрація каталізатора	Умови експериментальних досліджень	Ступінь деградації забруднювача, %	Джерело інформації
1	2	3	4	5	6	7
$\text{CuFeS}_2/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Сульфаметазин ($\text{C}_{12}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2\text{S}$)	5 мг/дм ³	$[\text{CuFeS}_2]_0 = 500$ мг/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,8$ ммоль/дм ³ ; $V = 100$ см ³ ; $\text{pH}_0 = 7,1$; $T = 298$ К; $\tau = 2700$ с	86,4	[44]
$\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}/\text{цеоліт-Fe(НЧ)}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Трихлоретилен (C_2HCl_3)	0,15 ммоль/дм ³	$[\text{цеоліт-Fe(НЧ)}]_0 = 100$ мг/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 15$ ммоль/дм ³ ; $[\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}]_0 = 7$ ммоль/дм ³ ; $V = 250$ см ³ ; $\text{pH}_0 = 5,0$; $T = 293$ К; $\tau = 10800$ с	98,2	[46]
$\text{Fe(НЧ)-вГО}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$	Трихлоретан ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3$)	0,15 ммоль/дм ³	$[\text{Fe(НЧ)-вГО}]_0 = 800$ мг/дм ³	$[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 30$ ммоль/дм ³ ; $V = 250$ см ³ ; $\text{pH}_0 = 8,0$; $T = 293$ К; $\tau = 9000$ с	90,0	[47]

1	2	3	4	5	6	7
Fe(HЧ)-Cu(HЧ)- вГО/ Na ₂ CO ₃ ·1,5H ₂ O ₂	Трихлороетан (C ₂ H ₃ Cl ₃)	0,15 ммоль/дм ³	[Fe(HЧ)- Cu(HЧ)- вГО] ₀ =400 мг/дм ³	[Na ₂ CO ₃ ·1,5H ₂ O ₂] ₀ = =30 ммоль/дм ³ ; V= =250 см ³ ; pH ₀ =8,0; T=298 K; τ=9000 с	92,0	[51]
Fe(C ₅ H ₅) ₂ / Na ₂ CO ₃ ·1,5H ₂ O ₂	Амарант (C ₂₀ H ₁₁ N ₂ Na ₃ O ₁₀ S ₃)	50 мг/дм ³	[Fe(C ₅ H ₅) ₂] ₀ = =250 мг/дм ³	[Na ₂ CO ₃ ·1,5H ₂ O ₂] ₀ = =1500 мг/дм ³ ; V= =200 см ³ ; pH ₀ =3,0; T=303 K; τ=7200 с	90,0	[54]

3. Фактори, які впливають на ефективність передових процесів окиснення на основі натрію перкарбонату

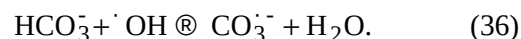
На ефективність передових процесів окиснення на основі натрію перкарбонату впливають, насамперед, параметри реакційного середовища, а саме: його температура, значення рН, аніонний склад.

Zhang зі співробітниками [55] досліджували вплив температури на константу швидкості деградації азобарвника Reactive Red 195 із використанням передового процесу окиснення – УФ/Fe(III)-C₂O₄²⁻/Na₂CO₃·1,5H₂O₂. Встановлено, що зі збільшенням температури від 283 до 323 К константа швидкості деградації барвника зросла від 2,23·10⁻² хв⁻¹ до 4,10·10⁻² хв⁻¹. Підвищення температури реакційного середовища зумовлює прискорення розкладу натрію перкарбонату та розчинення гідрогену пероксиду. Крім того, інтенсифікуються дифузійні процеси і, як наслідок, зростає швидкість взаємодії молекул азобарвника із окисником.

У випадку гомогенної активації натрію перкарбонату йонами металів (зокрема, Fe²⁺) більшої ефективності деградації органічних забруднювачів досягають у кислому середовищі. Нейтральне і лужне середовища придатніші для гетерогенної активації натрію перкарбонату, оскільки у них зростає ефективність генерування гідроксильних радикалів, а також інтенсивність перенесення електронів [13] і, відповідно, швидкість деградації органічних сполук.

Хлориди, сульфати або нітрати у реакційному середовищі виконують функцію слабких інгібіторів [38] під час застосування передових процесів окиснення на основі натрію перкарбонату для вилучення органічних забруднювачів із водних середовищ. Наявність навіть незначних

кількостей гідрогенкарбонатів у водних середовищах різко знижує ефективність очищення. Гідрогенкарбонати, взаємодіючи із гідроксильними радикалами, які є основним реакційноздатним видом у передових процесах окиснення на основі натрію перкарбонату, сприяють їх перетворенню на значно слабші окисники – карбонатні радикали [13]



Гідрогенкарбонати спричиняють підвищення значення рН середовища, що може впливати на ефективність очищення.

Висновки

Натрію перкарбонат як носій “твердого H₂O₂” має низку переваг, порівняно з H₂O₂ у рідкій фазі, а саме: більшу стабільність, менші витрати на зберігання і транспортування, високу ефективність у широкому діапазоні значень рН реакційного середовища. Нетоксичність натрію перкарбонату для водних екосистем, а також різноманіття методів його активації зумовлюють перспективність застосування цієї сполуки як основи передових процесів окиснення органічних забруднювачів водних середовищ.

Розглянуто методи гомогенної (активація ультрафіолетовим випромінюванням, електро-розрядною плазмою, в ультразвуковому полі, йонами металів) та гетерогенної (природними та штучно синтезованими мінералами, наночастинками заліза, іммобілізованими на допоміжні матеріали, наночастинками сполук заліза, біметалевими наноккомпозитами, фероценом) активації натрію перкарбонату та їх застосування у передових процесах окиснення органічних сполук на його основі. Встановлено, що кисле середовище ефективніше для гомогенної активації натрію перкарбонату йонами металів (зокрема, Fe²⁺), а

нейтральне або лужне середовище є придатнішим для гетерогенної активації натрію перкарбонату. З'ясовано, що підвищення температури реакційного середовища позитивно впливає на швидкість окиснювальної деградації органічних забруднювачів. Наявність незначних кількостей гідрогенкарбонатів, які виконують функцію поглиначів гідроксильних радикалів, у водних середовищах спричиняє істотне зменшення ефективності очищення.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України у межах проекту наукової роботи молодих вчених “Передові процеси окиснення, зокрема нанокаталітичного, в основі кавітаційних технологій очищення водних середовищ від резистентних N-заміщених органічних сполук” (номер державної реєстрації 0122U000790).

References

1. Pimentel, J. A. I., Dong, C.-D., Garcia-Segura, S., Abarca, R. R. M., Chen, C.-W., & de Luna, M. D. G. (2021). Degradation of tetracycline antibiotics by Fe^{2+} -catalyzed percarbonate oxidation. *Science of the Total Environment*, 781, 146411. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146411.
2. Du, C. H., & Liu, J. R. (2014). A new utilization approach of natural soda ash: to manufacture sodium percarbonate. *Latin American Applied Research*, 44 (2), 179–183. Retrieved from http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932014000200012.
3. Pesman, E., Imamoglu, S., Kalyoncu, E. E., & Kirci, H. (2014). The effects of sodium percarbonate and perborate usage on pulping and flotation deinking instead of hydrogen peroxide. *BioResources*, 9 (1), 523–536. DOI: 10.15376/biores.9.1.523-536.
4. Zhang, B.-T., Kuang, L., Teng, Y., Fan, M., & Ma, Y. (2021). Application of percarbonate and peroxymonocarbonate in decontamination technologies. *Journal of Environmental Sciences*, 105, 100–115. DOI: 10.1016/j.jes.2020.12.031.
5. Forwood, J. M., Harris, J. O., Landos, M., & Deveney, M. R. (2015). Histological evaluation of sodium percarbonate exposure on the gills of rainbow trout. *Diseases of Aquatic Organisms*, 114, 263–268. DOI: 10.3354/dao02861.
6. Yu, X., Kamali, M., Aken, P. V., Appels, L., Van der Bruggen, B., & Dewil, R. (2021). Synergistic effects of the combined use of ozone and sodium percarbonate for the oxidative degradation of dichlorvos. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101721. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101721.
7. Więckol-Ryk, A., Bialecka, B., & Thomas, M. (2020). Effect of green oxidizing agent on inhibition of *Escherichia coli* present in livestock wastes. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231 (9), 466–481. DOI: 10.1007/s11270-020-04824-3.
8. Srisaikham, S., Isobe, N., & Suksombat, W. (2017). The inhibitory effect of sodium thiocyanate and sodium percarbonate ratios on microorganism growth in raw milk samples as an effective treatment to extend milk quality during storage. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 39 (1), 77–89. DOI: 10.14456/sjstpsu.2017.9.
9. Thoo, R., Siuda, W., & Jasser, I. (2020). The effects of sodium percarbonate generated free oxygen on *Daphnia* – Implications for the management of harmful algal blooms. *Water*, 12, 1304–1315. DOI: 10.3390/w12051304.
10. Cheng, X., Lian, J., Ren, Z., Hou, C., Jin, Y., Zhang, L., ... Liang, H. (2021). Coupling sodium percarbonate (SPC) oxidation and coagulation for membrane fouling mitigation in algae-laden water treatment. *Water Research*, 204, 117622. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117622.
11. Iskander, S. M., Novak, J., Brazil, B. & He, Z. (2017). Percarbonate oxidation of landfill leachate towards removal of ultraviolet quenchers. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3 (6), 1162–1170. DOI: 10.1039/C7EW00343A.
12. Febriana, T. A., Khairiza, M. R., Maulina, R., Utami, T. S., Arbianti, R., & Hermansyah, H. (2020). Concentration optimization of sodium percarbonate as buffering catholyte on stacked microbial desalination cell by utilizing tofu wastewater as a substrate. *Engineering Journal*, 24 (4), 217–228. DOI: 10.4186/ej.2020.24.4.217.
13. Liu, X., He, S., Yang, Y., Yao, B., Tang, Y., Luo, L., ... Zhou, Y. (2021). A review on percarbonate-based advanced oxidation processes for remediation of organic compounds in water. *Environmental Research*, 200, 111371. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111371.
14. Ling, X., Deng, J., Ye, C., Cai, A., Ruan, S., Chen, M., & Li, X. (2021). Fe(II)-activated sodium percarbonate for improving sludge dewaterability: Experimental and theoretical investigation combined with the evaluation of subsequent utilization. *Science of the Total Environment*, 799, 149382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149382.
15. Dangi, M. B., Urynowicz, M. A., Schultz, C. L., & Budhathoki, S. (2022). A comparison of the soil natural oxidant demand exerted by permanganate, hydrogen peroxide, sodium persulfate, and sodium percarbonate.

Environmental Challenges, 7, 100456. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100456.

16. Sablas, M. M., de Luna, M. D. G., Garcia-Segura, S., Chen, C.-W., Chen, C.-F., & Dong, C.-D. (2020). Percarbonate mediated advanced oxidation completely degrades recalcitrant pesticide imidacloprid: Role of reactive oxygen species and transformation products. *Separation and Purification Technology*, 250, 117269. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117269.

17. Hung, C.-M., Chen, C.-W., Huang, C.-P., Tsai, M.-L., Wu, C.-H., Lin, Y.-L., ...Dong, C.-D. (2022). Efficacy and cytotoxicity of engineered ferromanganese-bearing sludge-derived biochar for percarbonate-induced phthalate ester degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126922. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126922.

18. Mohammadi, S., Moussavi, G., Yaghmaeian, K., & Giannakis, S. (2022). Development of a percarbonate-enhanced Vacuum UV process for simultaneous fluoroquinolone antibiotics removal and fecal bacteria inactivation under a continuous flow mode of operation. *Chemical Engineering Journal*, 431 (2), 134064. DOI: 10.1016/j.cej.2021.134064.

19. Yue-Hua, Z., Chun-Mei, X., & Chang-Hong, G. (2011). Application sodium percarbonate to oxidative degradation trichloroethylene contamination in groundwater. *Procedia Environmental Sciences*, 10 (B), 1668–1673. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.262.

20. Ohura, R., Katayama, A., & Takagishi, T. (1992). Degradation of sulfonated azo dyes with sodium percarbonate. *Textile Research Journal*, 62 (9), 552–556. DOI: 10.1177/004051759206200909.

21. Zhang, J., Wang, X., & Dong, C. (2019). Decolorization of triphenylmethane dyes and dye-doped silica microspheres using sodium percarbonate. *Desalination and Water Treatment*, 153, 312–320. DOI: 10.5004/dwt.2019.23904.

22. Nalliah, R. E. (2019). Reaction of FD&C Blue 1 with sodium percarbonate: multiple kinetics methods using an inexpensive light meter. *Journal of Chemical Education*, 96, 1453–1457. DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00589.

23. Viisimaa, M., & Goi, A. (2014). Use of hydrogen peroxide and percarbonate to treat chlorinated aromatic hydrocarbon-contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 22 (1), 30–39. DOI: 10.3846/16486897.2013.804827.

24. Zhang, Y.-H., Sun, Y.-G., Yue, L.-H., & Guo, C.-H. (2013). Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in groundwater by sodium percarbonate oxidation. *Asian Journal of Chemistry*, 25 (11), 5917–5920. DOI: 10.14233/ajchem.2013.14047.

25. Gao, J., Duan, X., O'Shea, K., & Dionysiou, D. D. (2020). Degradation and transformation of bisphenol A

in UV/sodium percarbonate: Dual role of carbonate radical anion. *Water Research*, 171, 115394. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115394.

26. Qiu, Z., Rao, G., Wang, L., & Wang, L. (2021). Photo-assisted degradation of naphthalene by sodium percarbonate system. *Advances in Environmental Protect*, 11 (3), 497–505. DOI: 10.12677/aep.2021.113055.

27. Ortiz-Marin, A. D., Bandala, E. R., Ramírez, K., Moeller-Chávez, G., Pérez-Estrada, L., Ramírez-Pereda, B., & Amabilis-Sosa, L. E. (2022). Kinetic modeling of UV/H₂O₂, UV/sodium percarbonate, and UV/potassium peroxymonosulfate processes for albendazole degradation. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2022-01-08. DOI: 10.1007/s11144-021-02152-z.

28. Li, L., Guo, R., Zhang, S., & Yuan, Y. (2022). Sustainable and effective degradation of aniline by sodium percarbonate activated with UV in aqueous solution: Kinetics, mechanism and identification of reactive species. *Environmental Research*, 207, 112176. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112176.

29. Pieczykolan, B., Płonka, I., & Barbusiński, K. (2016). Discoloration of dye wastewater by modified UV-Fenton process with sodium percarbonate. *Architecture Civil Engineering Environment*, 9 (4), 135–140. DOI: 10.21307/acee-2016-060.

30. Kozak, J., & Włodarczyk-Makula, M. (2018). The use of sodium percarbonate in the Fenton reaction for the PAHs oxidation. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 28 (2), 124–139. DOI: 10.2478/ceer-2018-0024.

31. Kozak, J., & Włodarczyk-Makula, M. (2019). The use of sodium carbonate-hydrogen peroxide (2/3) in the modified Fenton reaction to degradation PAHs in coke wastewater. *Proceedings*, 16 (1), 44–48. DOI: 10.3390/proceedings2019016044.

32. Wang, T., Jia, H., Guo, X., Xia, T., Qu, G., Sun, Q., & Yin, X. (2018). Evaluation of the potential of dimethyl phthalate degradation in aqueous using sodium percarbonate activated by discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*, 346, 65–76. DOI: 10.1016/j.cej.2018.04.024.

33. Tang, S., Yuan, D., Rao, Y., Li, M., Shi, G., Gu, J., & Zhang, T. (2019). Percarbonate promoted antibiotic decomposition in dielectric barrier discharge plasma. *Journal of Hazardous Materials*, 366, 669–676. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.056.

34. Geng, T., Yi, C., Yi, R., Yang, L., & Nawaz, M. I. (2020). Mechanism and degradation pathways of bisphenol A in aqueous solution by strong ionization discharge. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231 (4), 185–201. DOI: 10.1007/s11270-020-04563-5.

35. Lin, X., He, J., Xu, L., Fang, Y., & Rao, G. (2020). Degradation of metronidazole by ultrasound-

assisted sodium percarbonate activated by ferrous sulfate. *Water Pollution and Treatment*, 8 (3), 66–76. DOI: 10.12677/wpt.2020.83010.

36. Eslami, A., Mehdipour, F., Lin, K.-Y. A., Maleksari, H. S., Mirzaei, F., & Ghanbari, F. (2020). Sono-photo activation of percarbonate for the degradation of organic dye: The effect of water matrix and identification of by-products. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 100998. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100998.

37. Ma, J., Yang, X., Jiang, X., Wen, J., Li, J., Zhong, Y., ...Wang, Y. (2020). Percarbonate persistence under different water chemistry conditions. *Chemical Engineering Journal*, 389, 123422. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123422.

38. Tang, P., Jiang, W., Lu, S., Zhang, X., Xue, Y., Qiu, Z., & Sui, Q. (2017). Enhanced degradation of carbon tetrachloride by sodium percarbonate activated with ferrous ion in the presence of ethyl alcohol. *Environmental Technology*, 40 (1), 1–9. DOI: 10.1080/09593330.2017.1393012.

39. Liang, H., Cui, M., Su, R., Liu, Z., Zhang, J., & Huang, R. (2020). Rapid degradation of p-chlorophenol by the activated percarbonate. *Chemical Engineering Transactions*, 81, 235–240. DOI: 10.3303/CET2081040.

40. Farooq, U., Sajid, M., Shan, A., Wang, X., & Lyu, S. (2021). Role of cysteine in enhanced degradation of trichloroethane under ferrous percarbonate system. *Chemical Engineering Journal*, 423, 130221. DOI: 10.1016/j.cej.2021.130221.

41. Fu, X., Wei, X., Zhang, W., Yan, W., Wei, P., & Lyu, S. (2022). Enhanced effects of reducing agent on oxalate chelated Fe(II) catalyzed percarbonate system for benzene degradation. *Water Supply*, 22 (1), 208–219. DOI: 10.2166/ws.2021.278.

42. Li, L., Huang, J., Hu, X., Zhang, S., Dai, Q., Chai, H., & Gu, L. (2019). Activation of sodium percarbonate by vanadium for the degradation of aniline in water: Mechanism and identification of reactive species. *Chemosphere*, 215, 647–656. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.047.

43. Ishizaki, U., Takahashi, I., Sato, K., & Yoshimune, K. (2021). 2-[bis (carboxymethyl) amino] propanoic acid-chelated copper chelate enhances bacterial elimination by sodium percarbonate. *Biocontrol Science*, 26 (1), 9–15. DOI: 10.4265/bio.26.9.

44. Li, Y., Dong, H., Li, L., Xiao, J., Xiao, S., & Jin, Z. (2021). Efficient degradation of sulfamethazine via activation of percarbonate by chalcopyrite. *Water Research*, 202, 117451. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117451.

45. Danish, M., Gu, X., Lu, S., Zhang, X., Fu, X., Xue, Y., ...Qureshi, A. S. (2016). The effect of chelating

agents on enhancement of 1,1,1-trichloroethane and trichloroethylene degradation by Z-nZVI-catalyzed percarbonate process. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227 (9), 301–314. DOI: 10.1007/s11270-016-3005-x.

46. Danish, M., Gu, X., Lu, S., Xu, M., Zhang, X., Fu, X., ...Nasir, M. (2016). Role of reactive oxygen species and effect of solution matrix in trichloroethylene degradation from aqueous solution by zeolite-supported nano iron as percarbonate activator. *Research on Chemical Intermediates*, 42 (9), 6959–6973. DOI: 10.1007/s11164-016-2509-8.

47. Farooq, U., Danish, M., Lu, S., Naqvi, M., Gu, X., Fu, X., ...Nasir, M. (2017). Synthesis of nZVI@reduced graphene oxide: an efficient catalyst for degradation of 1,1,1-trichloroethane (TCA) in percarbonate system. *Research on Chemical Intermediates*, 43 (5), 3219–3236. DOI: 10.1007/s11164-016-2821-3.

48. Dai, Z., Liang, L., Wang, M., & Du, E. (2019). Degradation of DDTs by nano Fe₃O₄/sodium percarbonate and their degradation products. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 39 (4), 1183–1190. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0449.

49. Danish, M., Gu, X., Lu, S., Ahmad, A., Naqvi, M., Farooq, U., ...Xue, Y. (2017). Efficient transformation of trichloroethylene activated through sodium percarbonate using heterogeneous zeolite supported nano zero valent iron-copper bimetallic composite. *Chemical Engineering Journal*, 308, 396–407. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.051.

50. Danish, M., Gu, X., Lu, S., Brusseau, M. L., Ahmad, A., Naqvi, M., ...Miao, Z. (2017). An efficient catalytic degradation of trichloroethene in a percarbonate system catalyzed by ultra-fine heterogeneous zeolite supported zero valent iron-nickel bimetallic composite. *Applied Catalysis A: General*, 531, 177–186. DOI: 10.1016/j.apcata.2016.11.001.

51. Farooq, U., Danish, M., Lu, S., Brusseau, M. L., Naqvi, M., Fu, X., ...Qiu, Z. (2017). Efficient transformation in characteristics of cations supported-reduced graphene oxide nanocomposites for the destruction of trichloroethane. *Applied Catalysis A: General*, 544, 10–20. DOI: 10.1016/j.apcata.2017.07.007.

52. Xu, J., Wang, L., Chen, J.-B., Xu, F., Wang, K.-Q., Hou, Z.-F., & Huang, T.-Y. (2020). Degradation of AO7 with magnetic Fe₃O₄-CuO heterogeneous catalyzed sodium percarbonate system. *Environmental Science*, 41 (4), 1734–1742. DOI: 10.13227/j.hjkx.201908117.

53. Wang, Q., Tian, S., & Ning, P. (2014). Ferrocene-catalyzed heterogeneous Fenton-like degradation of Methylene blue: Influence of initial solution pH. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 6334–6340. DOI: 10.1021/ie500115j.

54. Lin, K.-Y. A., Lin, J.-T., & Lin, Y.-F. (2017). Heterogeneous catalytic activation of percarbonate by

ferrocene for degradation of toxic amaranth dye in water. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 78, 144–149. DOI: 10.1016/j.jtice.2017.05.017.

55. Zhang, C., Dong, Y., Li, B., & Li, F. (2018). Comparative study of three solid oxidants

as substitutes of H_2O_2 used in Fe (III)-oxalate complex mediated Fenton system for photocatalytic elimination of reactive azo dye. *Journal of Cleaner Production*, 177, 245–253. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.211.

Yu. V. Sukhatskyi, M. V. Shepida, K. M. Siryk

Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemistry and Technology of Inorganic Substances

SODIUM PERCARBONATE-BASED ADVANCED OXIDATION PROCESSES. REVIEW

The advantages of sodium percarbonate as a carrier of “solid hydrogen peroxide” compared to hydrogen peroxide in the liquid phase are considered. Methods of homogeneous (activation by ultraviolet radiation, electrodischarge plasma, in ultrasonic field, by metal ions) and heterogeneous (by natural and artificially synthesized minerals, iron nanoparticles that are immobilized on support materials, nanoparticles of iron compounds, bimetallic nanocomposite, ferrocene) activation of sodium percarbonate and their application in advanced oxidation processes of organic compounds based on it are presented. It was found that the acidic environment is more effective for homogeneous activation of sodium percarbonate by metal ions (in particular Fe^{2+}), and a neutral or alkaline environment is more suitable for heterogeneous activation of sodium percarbonate.

Key words: sodium percarbonate; hydrogen peroxide; advanced oxidation processes; activation; hydroxyl radicals; organic compounds; iron nanoparticles.